



Maria Cristina Quesnel de Flainville

**Análise da Dinâmica da Atenuação por
Chuvas em Regiões Tropicais**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Luiz A. R. da Silva Mello
Co-orientador: Dr. Erasmus Couto B. de Miranda

Rio de Janeiro

Abril de 2008



Maria Cristina Quesnel de Flainville

**Análise da Dinâmica da Atenuação por
Chuvas em Regiões Tropicais**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Luiz Alencar Reis da Silva Mello
Orientador

Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Erasmus Couto Brazil de Miranda
Co-Orientador
UCP

Dr. Flavio José Vieira Hasselmann
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Rodolfo Saboia Lima de Souza
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Rodrigo Martins de Souza
EB

Dr. Jorge Luis R. Pedreira de Cerqueira
IME

Dr. Julio Cesar Rodrigues Dal Bello
UFF

Dra. Marta Pudwell Chaves de Almeida
Wings Telecom

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de abril de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Maria Cristina Quesnel de Flainville

Possui graduação em Engenharia Elétrica com especialização em Eletrônica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1973) e mestrado em Engenharia Elétrica na área de concentração de Eletromagnetismo Aplicado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2002). Atualmente é professora do curso de engenharia elétrica e telecomunicação da Universidade Católica de Petrópolis.

Ficha Catalográfica

Flainville, Maria Cristina Quesnel de

Análise da dinâmica da atenuação por chuvas em regiões tropicais / Maria Cristina Quesnel de Flainville ; orientador: Luiz A. R. da Silva Mello ; co-orientador: Erasmus Couto B. de Miranda. – 2008.

149 f. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Atenuação por chuvas. 3. Taxa de variação da atenuação por chuvas. 4. Dinâmica da atenuação por chuvas. 5. Atenuação por chuvas em regiões tropicais. 6. Rádio propagação. 7. Rádio meteorologia. I. Mello, Luiz A. R. da Silva. II. Miranda, Erasmus Couto B. de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Dedico e agradeço a Deus
por ter colocado no meu caminho esta oportunidade
e me iluminado nos estudos.

Agradecimentos:

- à Universidade Católica de Petrópolis e Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pelo convênio;
- aos Profs. do Centro de Estudos de Telecomunicações dos anos 2000 a 2008;
- ao Prof. Adrian Akau;
- ao cientista Max M. J. L. van de Kamp;
- ao meteorologista Andrew Negri;
- à Alcina Portes;
- aos colegas e aos funcionários do Centro de Estudos de Telecomunicações dos anos 2000 a 2008;
- à Profa. Marlene S. Pontes;
- ao orientador Prof. Luiz A. R. da Silva Mello;
- ao co-orientador Prof. Erasmus Couto B. de Miranda;
- a todos os responsáveis pelos sistemas de telecomunicações de hoje que me permitiram a interatividade entre vários cientista desta Terra;
- à Tesla, o grande gênio da propagação eletromagnética e o visionário da energia radiante;
- à Maxwell, o grande gênio do eletromagnetismo.

Resumo

Quesnel de Flainville, Maria Cristina; Silva Mello, Luiz A.R. da (Orientador). **Análise da Dinâmica da Atenuação por Chuvas em Regiões Tropicais**. Rio de Janeiro, 2008. 149p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O principal efeito causador de indisponibilidade em sistemas de rádio comunicações com frequências superiores a 10 GHz é a atenuação por chuvas, especificamente a chuva convectiva, que é predominante em climas tropicais. Nesta tese será realizado o estudo e modelagem do comportamento dinâmico da atenuação por chuvas em enlaces terrestres e via satélite, com base em medidas realizadas no Brasil. Os aspectos dinâmicos da atenuação relacionam-se com as funções de distribuição de probabilidade de três variáveis aleatórias: a taxa de variação da atenuação com o tempo, o número de eventos em que um certo nível de atenuação é excedido e as durações individuais destes eventos. Em outras palavras, trata-se de problema de cruzamento de níveis aplicado à série temporal da atenuação. Ao contrário da distribuição cumulativa da atenuação, da qual informação que pode ser efetivamente retirada é limitada, a análise estatística de cada nível de atenuação, em separado, provê uma completa caracterização do fenômeno da atenuação servindo de base para aplicações tais como a construção de técnicas adaptativas de controle de ganho, metodologias de adaptação do sinal por códigos, modulações ou taxas de bits e a elaboração de esquemas de diversidade de rotas, espaço, sítio ou tempo. Utilizando o banco de dados de medidas de atenuação por chuvas em regiões tropicais e equatoriais brasileiras, obtido em medidas realizadas em seis localidades, tanto em enlaces terrestres como via satélite, foram analisados neste trabalho os comportamentos estatísticos da taxa de variação temporal da atenuação e da duração de eventos. Foi tratado, ainda, o problema do cruzamento de níveis aplicado ao conceito de disponibilidade. A informação obtida a partir dos resultados da análise dinâmica pode ser usada, como já mencionado, no tratamento de vários problemas fundamentais do projeto de sistemas de comunicações. A tese tem, também, como objetivo, contribuir para o aumento da base mundial de dados da análise da dinâmica da atenuação, principalmente em climas tropicais e equatoriais, onde tais dados são bastante escassos.

Palavras-chave

Atenuação por chuvas; Taxa de variação da atenuação por chuvas; Dinâmica da atenuação por chuvas; Atenuação por chuvas em regiões tropicais; Rádio propagação; Rádio meteorologia.

Abstract

Quesnel de Flainville, Maria Cristina; Silva Mello, Luiz A.R. da (Advisor). **Dynamic Analysis of Rain Attenuation in Tropical Regions**. Rio de Janeiro, 2008. 149p. PhD Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main effect causing non-availability in radio communication systems operating in frequencies above 10GHz, is the rain attenuation, particularly the heavy convective rain that is predominant in tropical regions. This thesis presents a detailed study and modelling of the dynamics of rain attenuation in terrestrial links and earth-space links, based on data obtained in long-term experimental measurements in Brazil. The dynamic aspects of rain attenuation can be described by probability distribution functions of three variables: the rate of change of the attenuation with time (fade slope), the number of events of a certain level of attenuation to be exceeded and the individual duration of these events. In other words, the level crossing applied to the attenuation time series. In contrast to the cumulative distribution of the attenuation, from which limited information can effectively be obtained, the separate statistical analysis of each level of attenuation can provide a complete understanding of the phenomenon, allowing the development of adaptive power control techniques, methods for signal adaptation using codes, modulation or bits rate and the design of spacial, routing, site and time diversity strategies. The work is based on rain attenuation data measured in terrestrial and earth-space links operating at frequencies above 10 GHz in 6 Brazilian locations. The study includes the analysis and modelling of the statistical behaviour of the rate of variation of the attenuation with time and the event durations. Also considered, is the level crossing problem applied to the availability concept. As mentioned, the information obtained from the dynamic analysis results and modelling can be used for the treatment of various fundamental problems in the radio communication system project. A contribution to increase the database of dynamic attenuation mainly in tropical and equatorial climates, where data is scarce, is also a result of this thesis.

Keywords

Rain attenuation; Fade slope rain attenuation; Dynamic rain attenuation; Tropics rain attenuation; Radio propagation; Radio meteorology

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
1.1. Motivação	15
1.2. Revisão Bibliográfica	17
1.3. Organização da Tese	17
2 ANÁLISE DO PROBLEMA DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS	19
2.1. Propagação nas faixas de microondas e ondas milimétricas	19
2.2. Atenuação por chuvas	20
2.3. Características da precipitação em climas tropicais	21
2.4. Dinâmica da chuva em regiões tropicais	24
2.5. Análise estatística da atenuação por chuvas	27
2.6. Análise estatística da taxa de variação da atenuação por chuvas	30
2.6.1. Método da célula equivalente de chuva	31
2.6.2. Distribuição de Van de Kamp	33
3 SÍTIOS DE MEDIDAS E PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS	36
3.1. Características dos enlaces	36
3.1.1. Enlaces Terra – satélite	38
3.1.2. Enlaces terrestres	39
3.2. Procedimento de análise	41
4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA TAXA DE VARIAÇÃO DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS	45
4.1. Densidades de probabilidade medida da taxa de variação da atenuação por chuvas	45
4.1.1. Densidades de probabilidade da taxa de variação da atenuação nos enlaces Terra – satélite	45
4.1.2. Densidades de probabilidade da taxa de variação da atenuação nos enlaces terrestres	49
4.2. Modelagem da densidade de probabilidade da taxa de variação da atenuação por chuvas	52
4.2.1. Escolha da densidade para modelagem	52
4.2.2. Dependência com a frequência	55
4.2.3. Dependência com o comprimento do enlace	57
4.2.4. Dependência com o ângulo de elevação para enlaces satélite	58
4.2.5. Comportamento da média e desvio padrão da distribuição com o limiar de atenuação	59
4.2.6. Conclusões	63
5 MODELO PARA PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA TAXA DE VARIAÇÃO DA ATENUAÇÃO	64
5.1. Desenvolvimento dos modelo de predição	64
5.1.1. Avaliação do modelo de predição	71

6 DURAÇÃO DE EVENTOS DE ATENUAÇÃO E GRAU DE INDISPONIBILIDADE	75
6.1. Introdução	75
6.2. Conceitos básicos de análise dinâmica da atenuação	76
6.3. Modelamento matemático-estatístico da distribuição cumulativa de duração de eventos	77
6.3.1. Bases para o modelamento – teoria da confiabilidade e modelos existentes	77
6.3.2. Resultados da estimação de função distribuição de probabilidade do tempo de duração de eventos	79
6.3.3. Modelo geoclimático para estimação dos parâmetros da Weibull	82
6.4. Definição de grau de indisponibilidade e resultados	88
6.4.1. Ajuste do modelo exponencial	90
6.4.2. Escalonamento em frequência	97
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
7.1. Conclusões	99
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE A	106
APÊNDICE B	123
APÊNDICE C	128
APÊNDICE D	132
ANEXO 1	136

Lista de figuras

Figura 2.1 - Atenuação específica devida a gases atmosféricos e hidrometeoros.	19
Figura 2.2 – Distribuição da chuva horizontal na região Amazônica.	23
Figura 2.3 - Estrutura em 3D da chuva na região Amazônica: corte AB da figura 2.2	24
Figura 2.4 – Primeira fase: precipitação convectiva isolada em torre	25
Figura 2.5 - Fase madura em que a nuvem cobre a área Ag	26
Figura 2.6 – Fase de enfraquecimento	26
Figura 2.7 – Fase de dissipação	27
Figura 2.8 – Exemplo de sinal recebido no enlace Bradesco – RIS – SP no dia 12/02/1994	28
Figura 2.9 – Exemplo de atenuação por chuvas expandida mostrando em azul a atenuação excedida de 40dB. Parte do período do tempo da figura 2.8.	29
Figura 2.10 – Exemplo de distribuições cumulativas de probabilidades da atenuação por chuvas Enlace Bradesco-RIS.	29
Figura 2.11 – Exemplo de distribuições cumulativas anuais da taxa de precipitação por chuvas.	30
Figura 2.12 – Exemplo de taxa de variação da atenuação obtida de 2 em 2 segundos.	31
Figura 2.13 – Interseção da chuva com o primeiro elipsóide de Fresnel.	32
Figura 2.14 – Taxa de variação da atenuação por chuvas versus a velocidade da gota de chuva de 0,2; 0,3; 0,4 e 0,8 m/s para uma taxa de precipitação de 20 mm/h	33
Figura 2.15 – Distribuições de Van de Kamp da taxa de variação de atenuação de desvio padrão σ_{vk} (dB/s) condicionada a um valor de atenuação por chuvas.	35
Figura 3.1 – Set-up de medidas com a localização dos enlaces.	36
Figura 3.2 – UAD e o sistema de registro e análise de dados.	37
Figura 3.3 – Atenuação por chuvas em tempo real do enlace de Mosqueiro – PA.	39
Figura 3.4 – Atenuação por chuvas em tempo real do enlace do Rio de Janeiro – RJ.	39
Figura 3.5 – Atenuação em tempo real do enlace de Brasília – DF.	41
Figura 3.6 – Atenuação em tempo real do enlace de São Paulo – Cenesp 15 – SP.	41
Figura 3.7 – Sequência de operações do filtro da transformada de Fourier de modo rápido.	42
Figura 3.8 – Distribuição de probabilidade da taxa de variação obtido com software. Enlace terrestre de São Paulo – Cenesp 15.	44
Figura 3.9 – Amostra do processo de obtenção da média e desvio padrão.	44
Figura 4.1 - Densidades de probabilidade obtidas para o sítio de Belém (Mosqueiro) (latitude: 01°27' S).	46
Figura 4.2 - Densidades empíricas de probabilidade para o enlace de Belém (Mosqueiro).	47
Figura 4.3 - Curvas de nível relativas ao enlace Belém (Mosqueiro).	47
Figura 4.4 – Densidades de probabilidades obtidas para o sítio de Porto Alegre.	48

Figura 4.5 - Curvas de nível relativas as densidades empíricas apresentadas na figura 4.4 para o sítio de Porto Alegre.	49
Figura 4.6 - Perfil dos formatos das densidades de probabilidade para um enlace terrestre.	50
Figura 4.7 - Mapa de curvas de nível relativas a figura 4.6.	50
Figura 4.8 - Funções densidade de probabilidade condicionais ao valor de atenuação. Os valores de atenuação de 1 dB até 40 dB a um passo de 1 dB.	51
Figura 4.9 (repetição da figura 2.16) - Modelo de Van de Kamp.	52
Figura 4.10 - Comparação entre ajustes Lorentziano e Gaussiano para o enlace terrestre de Paranapiacaba ($d=42$ km, $f=15$ GHz).	53
Figura 4.11 - Comparação entre ajustes Lorentziano e Gaussiano para o enlace satélite de Belém (Mosqueiro) ($f=11,4$ GHz).	54
Figura 4.12 - Densidade empírica obtidas em enlace operando a 12 GHz (Rio de Janeiro, satélite).	55
Figura 4.13 - Densidade empírica obtida em enlace operando a 15 GHz (Bradesco, terrestre).	56
Figura 4.14 - Densidade empírica obtida em enlace operando a 23 GHz (Cassi, terrestre).	56
Figura 4.15 - Densidade empírica obtida em enlace operando a 38 GHz (Ceres, terrestre).	57
Figura 4.16 - Variação da densidade empírica com a distância para 3 enlaces terrestres em 23 GHz. O limiar de atenuação é 15 dB.	58
Figura 4.17 - Variação da densidade empírica com a inclinação para 3 enlaces satélite em 11,4 GHz. O limiar de atenuação é 15 dB.	58
Figura 4.18 - Variação da média com o limiar de atenuação para os enlaces satélite.	59
Figura 4.19 - Variação do desvio padrão com o limiar de atenuação para os enlaces satélite.	60
Figura 4.20- Variação da média com o limiar de atenuação para os enlaces terrestres de SP.	61
Figura 4.21 - Variação do desvio padrão com o limiar de atenuação para os enlaces terrestres de São Paulo.	61
Figura 4.22 - Variação da média com o limiar de atenuação para os enlaces terrestres de Brasília.	62
Figura 4.23 - Variação do desvio padrão com o limiar de atenuação para os enlaces terrestres de Brasília.	63
Figura 5.1 - Densidades de probabilidade para baixas atenuações evidenciando o alto grau de curtose dos estimadores.	65
Figura 5.2 - Densidades de probabilidade obtidas em enlace terrestre. Nota-se a diminuição da curtose com o nível de atenuação.	65
Figura 5.3 - Densidades de probabilidade obtida em enlace terrestre.	66
Figura 5.4 - Modelo gaussiano aplicado a densidades de probabilidade obtida em enlace terrestre.	66
Figura 5.5 - Modelo gaussiano aplicado a densidades de probabilidade obtida em enlace satélite.	67
Figura 5.6 - Especificidades do modelo PL.	69
Figura 5.7 - Resultados previstos versus valores observados para média em enlaces terrestres.	71
Figura 5.8 - Resultados previstos versus valores observados para desvio padrão em enlaces terrestres.	71

Figura 5.9 - Resultados previstos versus valores observados para média em enlaces satélite.....	72
Figura 5.10 - Resultados previstos versus valores observados para desvio padrão em enlaces satélite.	72
Figura 5.11 - Densidade empiricamente observada e obtida via modelo.	73
Figura 5.12 - Densidade empiricamente observada e obtida via modelo.	73
Figura 6.1 - Parâmetros necessários às definições dos processos A e B.	75
Figura 6.2 – Funções distribuição de probabilidade da duração de eventos. Sítio de Belém.....	78
Figura 6.3 - Funções distribuição de probabilidade da duração de eventos para o sítio do Rio de Janeiro.	79
Figura 6.4 - Funções distribuição de probabilidade da duração de eventos para o sítio de Curitiba.	79
Figura 6.5 - Funções distribuição de probabilidade da duração de eventos para o sítio de Porto Alegre.	80
Figura 6.6 - Gráfico previstos contra observados para o parâmetro de forma η ...	82
Figura 6.7 - Gráfico de probabilidade gaussiana para os resíduos do parâmetro de forma η	83
Figura 6.8 - Gráfico previstos contra resíduos para o parâmetro de forma η	83
Figura 6.9 - Gráfico previstos contra observados para o parâmetro de escala α ...	84
Figura 6.10 - Gráfico de probabilidade gaussiana para os resíduos do parâmetro de escala α	85
Figura 6.11 - Gráfico previstos contra resíduos para o parâmetro de escala α	85
Figura 6.12 - Comparativo entre o ajuste pelo modelo geoclimático e a distribuição Weibull estimada. Sítio de Belém no ano 1 e nível de 5 dB.	86
Figura 6.13 - Comparativo entre o ajuste pelo modelo geoclimático e a distribuição Weibull estimada. Sítio do Rio de Janeiro e nível de 15 dB.	87
Figura 6.14- Curvas de grau de indisponibilidade para os enlaces de 15GHz – São Paulo, ano 1.	88
Figura 6.15 - Curvas de grau de indisponibilidade para os enlaces de 15 GHz – São Paulo, ano 2.	88
Figura 6.16 - Curvas de grau de indisponibilidade para os enlaces de 18 GHz – São Paulo, ano 1.	89
Figura 6.17 - Ajuste exponencial para grau de indisponibilidade em Barueri.	90
Figura 6.18 - Ajuste exponencial para grau de indisponibilidade em Paranapiacaba.	91
Figura 6.19 - Ajuste exponencial de 2ª ordem para os sítios de Bradesco (topo) e Barueri. Ano 1.	92
Figura 6.20 - Ajuste exponencial de 2ª ordem para os sítios de Scania (topo) e Cenesp 15. Ano 1.	92
Figura 6.21 - Ajuste exponencial de 2ª ordem para o sítio de Paranapiacaba. Ano 1.	93
Figura 6.22 - Ajuste exponencial de 2ª ordem para os sítios de Shell (topo) e Cenesp 18. Ano 1.	93
Figura 6.23 - Ajuste exponencial de 2ª ordem para os sítios de Bradesco (topo) e Barueri. Ano 2.	94
Figura 6.24 - Ajuste exponencial de 2ª ordem para os sítios de Scania (topo) e Cenesp15. Ano 2.	95
Figura 6.25 - Ajuste exponencial de 2ª ordem para o sítio de Paranapiacaba. Ano 2.	95

Figura 6.26 - Grau de indisponibilidade para os enlaces de Cenesp 15 (15 GHz) e Cenesp 18 (18 GHz).	96
Figura 6.27 - Comparação ponto-a-ponto entre as curvas de grau de indisponibilidade entre enlaces de Cenesp 15 (15 GHz) e Cenesp 18 (18 GHz).	97

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Característica do enlace terrestre.	28
Tabela 3.1 – Dados dos enlaces terra –satélite.	38
Tabela 3.2 – Dados dos enlaces terrestres de São Paulo.	40
Tabela 3.3 – Dados dos enlaces terrestres do Distrito Federal.	40
Tabela 5.1 - Matriz de correlações para os enlaces terrestres.	68
Tabela 5.2 - Matriz de correlações para os enlaces satélite.	68
Tabela 5.3 - Resultados do modelo PL para enlaces terrestres.	70
Tabela 5.4 - Resultados do modelo PL para enlaces satélite.	70
Tabela 6.1 - Modelos testados contra o banco de dados brasileiro (apresentado no anexo 1).	78
Tabela 6.2 - Resultados da estimação de parâmetros do modelo “piecewise linear” para o fator de forma η	82
Tabela 6.3 - Resultados da estimação de parâmetros do modelo “piecewise linear” para o fator de escala α	84
Tabela 6.4 - Resumo dos parâmetros do ajuste exponencial de 2ª ordem para o ano 1 dos enlaces convergentes de São Paulo.	94
Tabela 6.5 - Resumo dos parâmetros do ajuste exponencial de 2ª ordem para o ano 2 dos enlaces convergentes de São Paulo.	96